

EFEITOS DA IONIZAÇÃO NEGATIVA DO AR EM AMBIENTES DE QUEDAS

D'ÁGUA: uma revisão das evidências científicas¹

Lilian Carla Moreira Bento²

Leonardo Santos Andrade²

Resumo: A atmosfera é uma camada gasosa que envolve o planeta Terra, desempenhando papel essencial na manutenção da vida e equilíbrio ambiental. Seus gases podem ser ionizados, ou seja, ganhar ou perder elétrons, formando íons positivos ou negativos. A ionização ocorre por processos físico-químicos, como radiação ultravioleta solar, descargas elétricas atmosféricas, quebras de gotas d'água em quedas d'água ou ondas do mar (efeito Lenard) etc. O objetivo deste trabalho é revisar evidências científicas sobre a geração de íons negativos em ambientes de quedas d'água e seus efeitos benéficos à saúde e ao bem-estar humano. A revisão será realizada por levantamento bibliográfico utilizando palavras-chave como "íons do ar", "íons negativos do ar", "quedas d'água", "turismo de saúde" e "serviços ecossistêmicos", em português e inglês, em bases de dados como Google Acadêmico, SciELO, Periódicos Capes, PubMed e ResearchGate. Esta pesquisa se relaciona com diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030: ODS 3 (Saúde e Bem-Estar), ao abordar os efeitos positivos desses ambientes sobre o bem-estar físico e psicológico; ODS 6 (Água Potável e Saneamento), ao ressaltar a importância da conservação e dinamismo das águas naturais; e ODS 15 (Vida Terrestre), ao destacar geomorfossítios que favorecem a ionização natural do ar.

Palavras-chave: Eletricidade atmosférica; Processos físico-químicos; Bem-estar humano.

INTRODUÇÃO

A atmosfera terrestre constitui um sistema dinâmico e complexo, composto por uma mistura de gases, partículas e campos energéticos que interagem continuamente com a superfície do planeta. Muito além de um simples envoltório gasoso, a atmosfera desempenha papel fundamental na manutenção da vida, na regulação climática e na mediação das relações entre os componentes bióticos e abióticos do meio ambiente. Entre os diversos processos físico-químicos que ocorrem nesse sistema, destaca-se a ionização do ar, fenômeno que consiste na perda ou ganho de elétrons por átomos e moléculas, resultando na formação de íons positivos e negativos.

¹A estruturação conceitual e as figuras deste artigo foram desenvolvidas pela autora com auxílio de ferramentas de inteligência artificial, utilizadas exclusivamente como suporte técnico e gráfico.

²Instituto de Química – UFCAT: liliancmb@ufu.br; ls_andrade@ufcat.edu.br

Nas últimas décadas, observa-se o aumento do interesse científico em compreender como a ionização do ar, especialmente a formação de íons negativos, influencia processos ambientais, fisiológicos e psicológicos. Intensificaram-se os debates em torno da geodiversidade e de seus valores, incluindo aqueles relacionados aos serviços ecossistêmicos e ao bem-estar humano. Apesar desse avanço, ainda são escassos os estudos que tratam de forma integrada a geodiversidade, os processos físico-químicos atmosféricos e os efeitos desses processos sobre a saúde e o bem-estar das populações humanas.

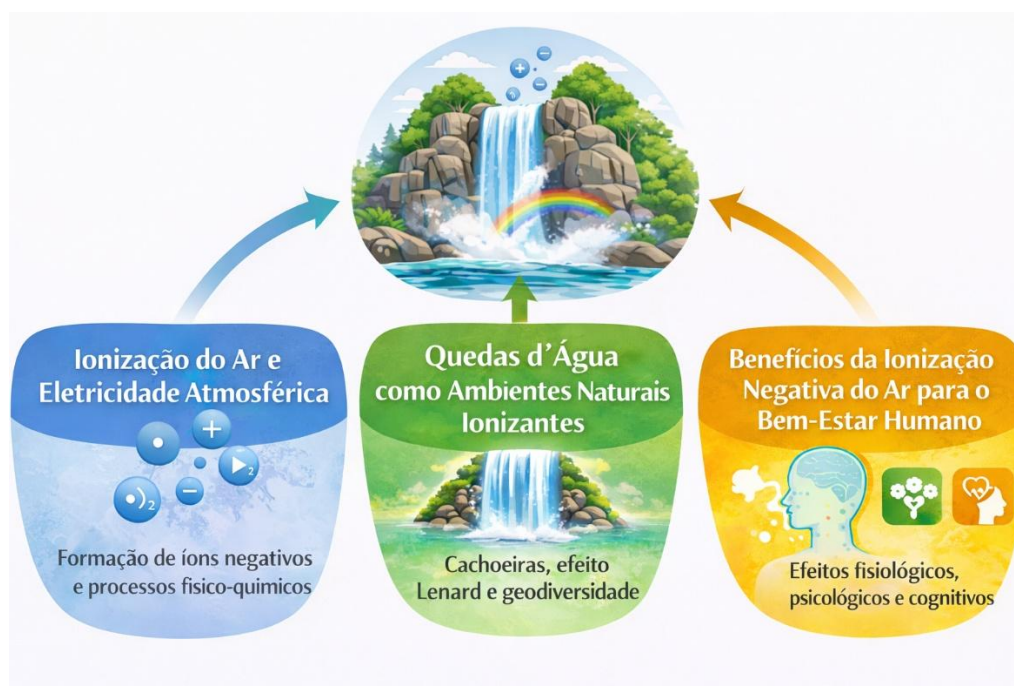
Nesse contexto, as quedas d'água emergem como elementos singulares da geodiversidade. Tradicionalmente valorizadas por seus atributos estéticos, culturais, turísticos e energéticos, essas geoformas apresentam, também, características ambientais específicas capazes de promover a ionização natural do ar em níveis significativamente elevados. Relatos empíricos e percepções populares associam, há muito tempo, a presença em ambientes de quedas d'água a sensações de relaxamento, vitalidade e bem-estar. Contudo, apenas recentemente essas experiências vêm sendo investigadas à luz de evidências científicas, especialmente no que se refere à eletricidade atmosférica e à geração de íons negativos do ar.

Diante disso, este trabalho tem como objetivo revisar as evidências científicas relacionadas à ionização negativa do ar, inicialmente de forma geral, abordando seus fundamentos físico-químicos e efeitos sobre o bem-estar humano, e, posteriormente, aprofundando a análise sobre os mecanismos específicos de geração desses íons em ambientes de quedas d'água. Ao final, busca-se correlacionar os benefícios associados a esses ambientes naturais com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030, ressaltando o papel da conservação dos sistemas naturais e da geodiversidade na promoção da saúde, do equilíbrio ambiental e da qualidade de vida.

Este artigo estrutura-se a partir de três eixos temáticos interdependentes, que permitem compreender de forma integrada a relação entre processos atmosféricos, geodiversidade e bem-estar humano. O primeiro eixo aborda os conceitos básicos de ionização do ar e eletricidade atmosférica, enfatizando os processos físico-químicos responsáveis pela formação de íons negativos, tanto em escala global quanto em ambientes naturais específicos. O segundo eixo destaca as quedas d'água como elementos da geodiversidade e ambientes naturais ionizantes, destacando o papel do

efeito Lenard, da fragmentação das gotas d'água e da interação água-rocha na geração e dispersão de íons negativos do ar. Por fim, o terceiro eixo discute os benefícios da ionização negativa do ar para o bem-estar humano, reunindo evidências científicas sobre seus efeitos fisiológicos, psicológicos, cognitivos e imunológicos, bem como suas implicações no contexto dos serviços ecossistêmicos e do turismo de saúde. A articulação desses eixos possibilita uma leitura sistêmica das quedas d'água como geoformas de elevado valor ambiental, funcional e social, reforçando sua relevância para estratégias de conservação e promoção da saúde alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (Figura 1).

Figura 1: Eixos temáticos do trabalho



Fonte: Elaboração própria.

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este trabalho caracteriza-se como uma revisão bibliográfica de natureza qualitativa, com enfoque interdisciplinar, voltada à análise das evidências científicas sobre a geração de íons negativos do ar e seus efeitos sobre o bem-estar humano, com ênfase em ambientes de quedas d'água. O levantamento bibliográfico foi realizado a partir de buscas sistemáticas em bases de dados nacionais e internacionais, incluindo *Google Acadêmico*, *SciELO*, *Periódicos CAPES*, *PubMed* e *ResearchGate*. Foram utilizadas palavras-chave em português e inglês, tais como

“íons do ar”, “íons negativos do ar”, “quedas d’água”, “air ions”, “negative air ions”, “waterfalls”, “wellnesstourism”, “serviços ecossistêmicos” e termos correlatos.

A seleção dos estudos considerou critérios de relevância temática, aderência ao objetivo da pesquisa e qualidade científica das fontes. Após a identificação inicial, procedeu-se à leitura analítica dos trabalhos selecionados, bem como à revisão manual de suas referências, com o objetivo de ampliar e aprofundar a compreensão dos processos físico-químicos de ionização do ar, dos mecanismos específicos associados ao efeito Lenard e das relações entre esses fenômenos, a geodiversidade e o bem-estar humano. A análise dos dados foi conduzida de forma integrada, buscando estabelecer conexões entre os resultados empíricos reportados na literatura e sua contribuição para os serviços ecossistêmicos e para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030 (Figura 2).

Figura 2: Procedimentos metodológicos utilizados



Fonte: Elaboração própria.

DESENVOLVIMENTO

FUNDAMENTOS DA IONIZAÇÃO DO AR E DA ELETRICIDADE ATMOSFÉRICA

Os conceitos fundamentais relacionados à ionização do ar, à eletricidade atmosférica e aos mecanismos de formação de íons negativos são discutidos a partir de contribuições clássicas e contemporâneas da literatura científica. Estudos pioneiros e de revisão, como os de Yates et al. (1986), estabelecem as bases conceituais sobre os íons atmosféricos, seus comportamentos e desafios metodológicos. Avanços no entendimento dos processos físico-químicos envolvidos na ionização do ar são apresentados por Lin e Lin (2017), que detalham os mecanismos de geração e determinação dos íons negativos, e por Beattie (2016), ao explicar o fenômeno da eletrificação por spray. Complementarmente, Luts et al. (2009) e Fioravanti (2009) abordam os fenômenos elétricos associados à fragmentação da água e à presença de cargas no ar, enquanto Enache e Bunescu (2019) reforçam a ionização do ar como um fator ambiental natural com potencial terapêutico.

Conceitos básicos de ionização do ar

A ionização do ar é um processo físico-químico no qual átomos ou moléculas neutras perdem ou ganham elétrons, formando partículas carregadas eletricamente, denominadas íons. Quando ocorre a perda de elétrons, formam-se íons positivos; quando há o ganho de elétrons, originam-se íons negativos. Na atmosfera terrestre, os principais constituintes envolvidos nesse processo são o nitrogênio (N_2) e o oxigênio (O_2), que representam a maior parte da composição do ar.

A energia necessária para remover um elétron dessas moléculas é relativamente elevada, situando-se entre 1300 kJ/mol e 1400 kJ/mol. Dessa forma, a ionização atmosférica depende da presença de fontes naturais ou artificiais de energia capazes de superar essa barreira energética. Em ambientes naturais, tais fontes incluem a radiação cósmica, a radiação ultravioleta solar, as descargas elétricas atmosféricas, processos fotoelétricos, reações bioquímicas associadas à fotossíntese e fenômenos mecânicos de cisalhamento da água, como aqueles observados em quedas d'água e na quebra de ondas do mar.

Os íons formados na atmosfera podem existir como partículas isoladas ou associar-se a outras moléculas, formando aglomerados iônicos. Essa evolução dos íons primários para íons secundários é dinâmica e depende diretamente das condições ambientais locais, como temperatura, umidade relativa, composição do ar

e presença de aerossóis. Em geral, os íons negativos do ar apresentam maior mobilidade e reatividade, características que influenciam tanto os processos atmosféricos quanto as interações com os organismos vivos.

Eletricidade atmosférica e formação de íons negativos

A eletricidade atmosférica compreende o conjunto de fenômenos elétricos que ocorrem na atmosfera terrestre, resultantes da interação entre campos elétricos naturais, partículas carregadas, radiação solar e processos físico-químicos contínuos. A atmosfera não constitui um meio eletricamente neutro; ao contrário, encontra-se permanentemente ionizada em diferentes graus, em função de agentes naturais como a radiação ultravioleta, os raios cósmicos, as descargas elétricas atmosféricas e os processos mecânicos associados ao movimento do ar e da água. Esses mecanismos promovem a remoção ou o ganho de elétrons por moléculas gasosas, originando íons positivos e negativos que participam ativamente da dinâmica atmosférica.

A formação de íons negativos ocorre, predominantemente, quando elétrons livres são capturados por moléculas eletronegativas presentes no ar, especialmente o oxigênio molecular (O_2). Esse processo resulta na formação de íons como o ânion radical superóxido (O_2^- ou $O_2^{\cdot-}$), que podem se associar a moléculas de água, formando íons hidratados mais estáveis. Tais espécies tendem a apresentar maior persistência em ambientes naturais, onde há menor concentração de poluentes atmosféricos e partículas artificiais, que normalmente neutralizam ou capturam essas cargas. Em regiões com cobertura vegetal preservada, elevada umidade e baixa interferência antrópica, a concentração de íons negativos do ar costuma ser significativamente superior à observada em ambientes urbanos.

A formação de íons negativos na atmosfera está intrinsecamente relacionada aos processos de eletricidade atmosférica e às interações entre radiação, partículas e campos elétricos naturais. Em termos físico-químicos, a ionização ocorre quando moléculas neutras do ar, como oxigênio (O_2) e nitrogênio (N_2), ganham ou perdem elétrons em decorrência da ação de agentes ionizantes, como radiação ultravioleta solar, raios cósmicos e descargas elétricas atmosféricas. No caso específico dos íons negativos, a captura de elétrons livres por moléculas de oxigênio resulta na formação de espécies carregadas negativamente, que podem posteriormente se agrupar a

moléculas de água, originando íons hidratados. Esses íons tendem a se concentrar nas camadas mais próximas da superfície terrestre, onde os processos de geração são mais intensos e contínuos.

Além dos mecanismos de ionização de origem radiativa e elétrica, os processos mecânicos desempenham papel fundamental na geração local de íons negativos do ar. A fragmentação de gotas de água durante fenômenos como chuvas intensas, ondas do mar e, especialmente, quedas d'água, promove a separação de cargas elétricas por meio do chamado efeito Lenard. Nesse processo, a ruptura das gotas gera microgotículas com excesso de carga negativa, enquanto as gotas maiores tendem a adquirir carga positiva. A evaporação subsequente das microgotículas favorece a liberação de elétrons e a formação de íons negativos estáveis no ar circundante. Esse mecanismo explica as elevadas concentrações de íons negativos observadas em ambientes de cachoeiras, associadas à turbulência hidráulica, à interação água-rocha e à elevada umidade relativa do ar, configurando condições atmosféricas singulares do ponto de vista elétrico e químico.

Ionização do ar e bem-estar humano: abordagens gerais

O interesse científico pelos efeitos dos íons negativos do ar sobre a saúde humana remonta ao início do século XX, intensificando-se a partir da década de 1950. Desde então, numerosos estudos têm investigado a relação entre a exposição aos NAI's (da sigla inglesa *Negative Air Íons*) e diferentes aspectos do bem-estar físico, fisiológico e psicológico.

De modo geral, o bem-estar humano é compreendido como um estado positivo que engloba dimensões físicas, mentais, sociais e ambientais, não se limitando à ausência de doenças. Nessa perspectiva, os serviços ecossistêmicos culturais e reguladores desempenham papel fundamental, ao proporcionar condições ambientais favoráveis à saúde e à qualidade de vida.

Diversas pesquisas indicam que a exposição a ambientes ricos em íons negativos do ar está associada à redução do estresse, à melhoria do humor, ao aumento da sensação de relaxamento e ao fortalecimento das funções cognitivas. Do ponto de vista fisiológico, há evidências de efeitos positivos sobre os sistemas respiratório, cardiovascular e imunológico, incluindo a regulação da pressão arterial,

a melhora do ritmo respiratório e alterações benéficas em parâmetros bioquímicos do sangue.

Esses efeitos têm sido explicados, em parte, pela interação dos íons negativos com os sistemas elétricos e bioquímicos do organismo humano. O corpo humano é, essencialmente, um sistema bioelétrico, no qual impulsos nervosos, reações metabólicas e processos celulares dependem de gradientes elétricos e iônicos. A inalação ou o contato com íons negativos pode influenciar esses processos, modulando respostas fisiológicas e psicológicas.

Além disso, estudos sugerem que os NAI's podem atuar na regulação de neurotransmissores, como a serotonina, contribuindo para a diminuição de sintomas depressivos e para a melhora do desempenho cognitivo. Embora ainda existam controvérsias e lacunas no conhecimento, o conjunto de evidências aponta para um potencial terapêutico dos ambientes naturalmente ionizados, reforçando a importância de abordagens interdisciplinares que integrem Geociências, Ciências da Saúde e Ciências Ambientais.

IONIZAÇÃO DO AR, GEODIVERSIDADE E AMBIENTES NATURAIS DE QUEDAS D'ÁGUA

A relação entre ionização do ar e bem-estar humano tem sido abordada sob diferentes perspectivas interdisciplinares. Estudos de revisão e de caráter conceitual, como os de Franco, Shanahan e Fuller (2017), Kuo (2015) e Summers et al. (2012), discutem os benefícios do contato com ambientes naturais para a saúde física e mental, ampliando a compreensão dos serviços ecossistêmicos associados à natureza. No campo da geodiversidade e de seus valores, Gray (2005), Brilha et al. (2018) e Pereira, Pereira e Brilha (2019) fornecem o embasamento teórico para compreender as quedas d'água como elementos abióticos de elevado valor ambiental e cultural. Especificamente quanto à ionização negativa do ar em ambientes de quedas d'água, destacam-se os trabalhos de Beattie (2016), Luts et al. (2009), Kolarz et al. (2012) e Wu et al. (2019), que demonstram, por meio de medições e análises físico-químicas, a elevada concentração de íons negativos gerados pelo efeito Lenard nesses ambientes.

Quedas d'água como elementos da geodiversidade

A geodiversidade pode ser compreendida como a diversidade dos componentes abióticos da natureza, englobando minerais, rochas, fósseis, solos, formas de relevo, águas e os processos naturais, passados e atuais, responsáveis por sua formação e transformação. Trata-se de um conceito análogo ao de biodiversidade, porém historicamente menos valorizado nas discussões ambientais, apesar de constituir a base física e funcional para a existência e a manutenção da vida no planeta. Nesse sentido, a geodiversidade representa não apenas o suporte material dos ecossistemas, mas também um elemento fundamental para a compreensão da evolução da Terra e das interações entre sociedade e natureza.

Diversos autores ressaltam que a separação entre componentes bióticos e abióticos do meio ambiente resulta em uma abordagem fragmentada da conservação ambiental, tradicionalmente centrada na biodiversidade. A incorporação da geodiversidade às estratégias de conservação permite uma visão mais holística, reconhecendo que processos geomorfológicos, hidrológicos e geológicos condicionam diretamente a distribuição dos ecossistemas, a paisagem e os serviços ecossistêmicos associados. Além disso, os elementos da geodiversidade possuem valores intrínsecos, científicos, educativos, culturais, estéticos e funcionais, que justificam sua valorização e proteção.

No âmbito das Geociências, a geodiversidade é objeto de estudo de diferentes ramos, como a geomorfologia, a geologia estrutural, a sedimentologia, a hidrologia e a geoquímica. As quedas d'água inserem-se, predominantemente, na categoria dos sistemas geomorfológicos fluviais, sendo compreendidas como geoformas associadas a rupturas de declive no perfil longitudinal dos cursos d'água. Essas rupturas, também conhecidas como *knickpoints*, representam descontinuidades topográficas que condicionam a dinâmica do escoamento fluvial e influenciam processos erosivos, deposicionais e hidrodinâmicos.

Embora popularmente conhecidas por diferentes denominações, como cachoeiras, cascatas ou cataratas, as quedas d'água apresentam ampla variabilidade morfológica, resultante de fatores como litologia, estrutura geológica, declividade, vazão, regime hidrológico e controle tectônico.

Do ponto de vista genético, a formação das quedas d'água não pode ser atribuída exclusivamente à ação da água como agente modelador. Estudos geomorfológicos demonstram que tanto mecanismos endógenos, como movimentos

tectônicos e falhamentos, quanto mecanismos exógenos, como erosão diferencial, variações litológicas e mudanças climáticas, podem originar rupturas de declive (Araújo, 2017; Bartorelli, 2012; Bento, 2010, 2022; Goudie, 2020). Assim, as quedas d'água configuram-se como registros da história evolutiva da paisagem, refletindo interações complexas entre processos geológicos, geomorfológicos e hidrológicos ao longo do tempo geológico.

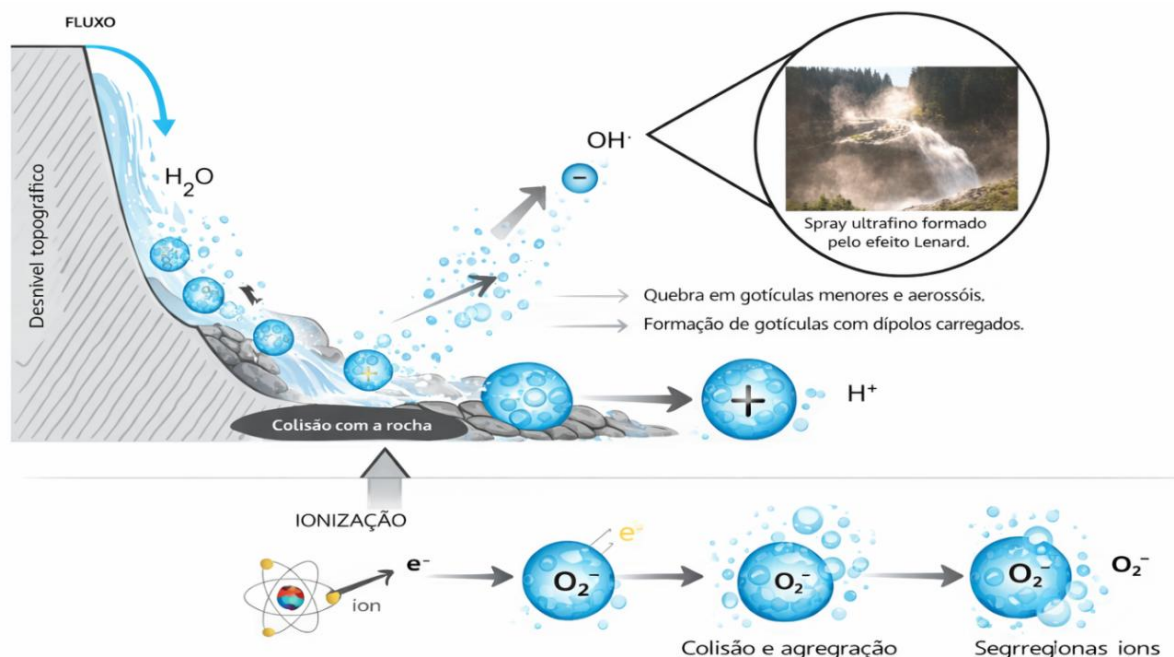
Ionização negativa do ar em ambientes de quedas d'água

Entre os diversos atributos ambientais associados às quedas d'água, a capacidade de promover a ionização negativa do ar destaca-se como um diferencial pouco perceptível, porém cientificamente relevante. O principal mecanismo responsável por esse fenômeno é conhecido como efeito Lenard, também denominado eletrificação por spray ou efeito cascata. Esse processo ocorre quando a água, ao despencar de um desnível topográfico, sofre intensa fragmentação em gotículas de diferentes tamanhos, resultando em separação de cargas elétricas.

Durante a queda, as gotas de água colidem entre si e com superfícies sólidas, como o substrato rochoso na base da queda. Essas colisões promovem a ruptura das ligações moleculares e a redistribuição de cargas elétricas, com tendência à concentração de cargas negativas em fragmentos menores e de cargas positivas em fragmentos maiores. As partículas negativamente carregadas, devido à sua menor massa e maior mobilidade, dispersam-se com maior facilidade no ar circundante, formando íons negativos gasosos.

Do ponto de vista físico-químico, os elétrons liberados durante o processo de cisalhamento da água tendem a se associar a moléculas de oxigênio e vapor d'água, originando íons negativos mais estáveis, como O_2^- e seus aglomerados hidratados $O_2^-(H_2O)_n$. A evolução desses íons primários para íons secundários ocorre de maneira contínua, influenciada por fatores como temperatura, umidade relativa, composição química do ar e presença de aerossóis (Figura 3).

Figura 3: Esquema de formação de íons negativos sob quedas d'água.



Fonte: Adaptado de Bento, 2022.

Ambientes de quedas d'água caracterizam-se, portanto, por elevadas concentrações de íons negativos do ar, significativamente superiores às observadas em áreas urbanas e industrializadas. Estudos indicam que, enquanto em ambientes urbanos a proporção entre íons negativos e positivos é reduzida, em áreas naturais preservadas essa relação tende a ser mais equilibrada ou favorável aos íons negativos. Próximo a quedas d'água, as concentrações podem atingir milhares de íons por centímetro cúbico, criando um microclima atmosférico singular.

Além do efeito Lenard, outros fatores contribuem para a manutenção desse ambiente ionizado, como a elevada umidade, a presença de vegetação associada aos cursos d'água e a baixa carga de poluentes atmosféricos. A interação entre íons negativos, compostos orgânicos voláteis emitidos pelas plantas (fitoncidas) e microrganismos presentes no ambiente resulta em uma atmosfera complexa, cuja composição tem sido associada a efeitos terapêuticos e restauradores.

BENEFÍCIOS DA IONIZAÇÃO NEGATIVA DO AR EM QUEDAS D'ÁGUA PARA O BEM-ESTAR HUMANO

Os efeitos benéficos da ionização negativa do ar em ambientes de quedas d'água sobre o bem-estar humano são sustentados por um conjunto de estudos

experimentais, clínicos e observacionais. Pesquisas conduzidas por Tikhonov et al. (2004), Sirota et al. (2008) e Jiang, Ma e Ramachandran (2018) evidenciam impactos positivos dos íons negativos em processos fisiológicos, imunológicos e metabólicos. No âmbito da saúde mental e do desempenho cognitivo, trabalhos como os de Goel et al. (2005), Dauphinais et al. (2012), Pino & Ragione (2013) e Vecchia et al. (2021) apontam associações significativas entre a exposição aos íons negativos e a redução de sintomas depressivos, estresse e fadiga mental. Estudos específicos em ambientes de cachoeiras, como os de Hartl et al. (2013), Grafetstätter et al. (2017), Pichler et al. (2018), Lazzerini, Orlando e De Prá (2018) e Bento (2022), reforçam que esses locais constituem microambientes terapêuticos naturais, nos quais a elevada ionização do ar contribui para estados de relaxamento, equilíbrio fisiológico e promoção do bem-estar integral.

Efeitos fisiológicos e imunológicos dos íons negativos do ar

O bem-estar humano é compreendido como um estado multidimensional que envolve aspectos físicos, mentais, sociais e ambientais. Evidências científicas acumuladas ao longo das últimas décadas indicam que a exposição a ambientes naturais ricos em íons negativos do ar está associada a diversos efeitos benéficos à saúde e à qualidade de vida (Tikhonov et al., 2004; Sirota et al., 2008; Jiang, Ma e Ramachandran, 2018; Goel et al., 2005; Dauphinais et al., 2012; Pino & Ragione, 2013; Vecchia et al., 2021; Hartl et al., 2013; Grafetstätter et al., 2017; Pichler et al., 2018; Lazzerini, Orlando e De Prá, 2018; Bento, 2022).

Do ponto de vista fisiológico, estudos relatam melhorias nos sistemas cardiovascular e respiratório, incluindo redução da pressão arterial, diminuição da frequência cardíaca e maior eficiência respiratória. Alterações positivas em parâmetros bioquímicos do sangue, como equilíbrio do pH e melhora da circulação, também têm sido associadas à exposição aos íons negativos. Esses efeitos são explicados pela interação dos íons com os sistemas bioelétricos do organismo, influenciando reações metabólicas, transporte de substâncias e propagação de impulsos nervosos (ENACHE; BUNESCU, 2019; FRANCO; SHANAHAN; FULLER, 2017; HARTL et al., 2013; JIANG; MA; RAMACHANDRAN, 2018; KUO, 2015; LAZZERINI; ORLANDO; DE PRÁ, 2018; PICHLER et al., 2018)

No campo da saúde mental e do funcionamento cognitivo, a literatura aponta para redução do estresse, diminuição de sintomas depressivos e melhora do humor em indivíduos expostos a ambientes naturalmente ionizados. A literatura tem apontado que os íons negativos atuam na modulação de neurotransmissores, como a serotonina, contribuindo para estados emocionais mais equilibrados e para o aumento da capacidade de concentração e desempenho cognitivo (DAUPHINAIS et al., 2012; GOEL et al., 2005; GRAFETSTÄTTER et al., 2017; PINO; RAGIONE, 2013; TIKHONOV et al., 2004; VECCHIA et al., 2021).

A combinação entre ionização negativa do ar, estímulos sensoriais (visuais e sonoros), presença de água em movimento e vegetação cria um ambiente propício a experiências restauradoras. Assim, as quedas d'água configuram-se como espaços privilegiados para práticas associadas ao turismo de saúde, à ecoterapia e a estratégias preventivas de promoção do bem-estar, reforçando seu papel como serviços ecossistêmicos culturais de elevado valor (Figura 4).

Figura 4: Benefícios ao bem-estar humano



Fonte: Elaboração própria.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão das evidências científicas apresentada neste trabalho demonstra que as quedas d'água, enquanto elementos da geodiversidade, desempenham papel

relevante na promoção do bem-estar humano por meio da ionização negativa natural do ar. Esse fenômeno, resultante principalmente do efeito Lenard, confere a esses ambientes características atmosféricas específicas, associadas a benefícios fisiológicos, psicológicos e cognitivos.

A valorização dessas funções amplia a compreensão dos múltiplos valores atribuídos às quedas d'água, indo além de seu uso estético, recreativo ou energético. Ao serem reconhecidas como fontes naturais de serviços ecossistêmicos relacionados à saúde e ao bem-estar, reforça-se a necessidade de sua conservação e de um planejamento territorial que considere seus atributos geoambientais.

Os resultados desta revisão dialogam diretamente com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030. O ODS 3 (Saúde e Bem-Estar) é contemplado ao evidenciar os efeitos positivos da exposição a ambientes naturalmente ionizados sobre a saúde física e mental. O ODS 6 (Água Potável e Saneamento) relaciona-se à valorização dos sistemas hídricos naturais e à importância da manutenção de cursos d'água dinâmicos e preservados. Já o ODS 15 (Vida Terrestre) é abordado ao destacar a relevância da geodiversidade e dos geomorfossítios na sustentação dos ecossistemas e na oferta de serviços ecossistêmicos essenciais.

Nesse sentido, as quedas d'água configuram-se como espaços estratégicos para a integração entre conservação ambiental, promoção da saúde e desenvolvimento sustentável. O reconhecimento científico de seus benefícios reforça a necessidade de políticas públicas e iniciativas de gestão que assegurem sua proteção, incentivem usos sustentáveis e promovam a educação ambiental, contribuindo para uma relação mais equilibrada entre sociedade e natureza.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, M. A. M. de. **Análise geomorfológica de quedas d'água na região de entre Douro e Vouga e a valorização do recurso na perspectiva do geoturismo**. 2017. 203 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e Ordenamento do Território) – Faculdade de Letras, Universidade do Porto, Porto, 2017.
- BARTORELLI, A. Contexto geológico e evolução da rede hidrográfica do Brasil. In: HASUI, Y. et al. (org.). **Geologia do Brasil**. São Paulo: Beca, 2012. p. 453-457.

- BEATTIE, J. K. The mechanism of spray electrification: the waterfall effect. **Atmos. Chem. Phys. Discuss.**, 2016.
- BENTO, L. C. M. Quedas d'água e bem-estar humano. In: CARNEIRO, V. A. **GEODIVERSIDADE: envolverências e experiências**. Anápolis: SAMA, 2022. p. 318-344.
- BENTO, L. C. M. Potencial geoturístico de quedas d'água do Estado de Minas Gerais, Brasil. **Caderno de Geografia**, v. 32, n. 68, 2022.
- BENTO, L. C. M. **Potencial geoturístico das quedas d'água de Indianópolis**. 2010. 150 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.
- BRILHA, J.; GRAY, M.; PEREIRA, D. I.; PEREIRA, P. Geodiversity – na integrative review as a contribution to the sustainable management of the whole of nature. **Environ Sci. Pol.**, v. 86, p. 19-28, 2018.
- DAUPHINAIS, D. R.; ROSENTHAL, J. Z.; Terman, M.; DiFEBBO, H. M.; TUGGLE, C.; ROSENTHAL, N. E. Controlled Trial of safety and efficacy of Bright light therapy vs. Negative air ions in patients with bipolar depression. **Psychiatry Research**, 196, 2012, 57-61.
- ENACHE, L. M.; BUNESCU, I. Air ionization - an environmental factor with therapeutic potential. **Georeview**, v. 1, n. 31, p. 31-39, 2019.
- FIORAVANTI, C. Eletricidade, no ar, na água, por toda parte. **Pesquisa Fapesp**, 158, abr. 2009.
- FRANCO, L. S.; SHANAHAN, D. F.; FULLER, R. A. A review of the benefits of nature experiences: more than meets the eye. **Int. J. Environ. Res. Public Health**, v. 14, 2017.
- GOEL, N.; Terman, M.; Terman, J. S.; MACCHI, M. M.; STEWART, J. W. Controlled Trial of Bright light and negative air ions for chronic depression. **Psychological Medicine**, 2005, 35, 945-955.
- GOUDIE, A. S. Waterfalls: forms, distribution, processes and rates of recession. **Quaestiones Geographicae**, Poznań, v. 39, n. 1, p. 5–22, 2020.
- GRAFETSTÄTTER, C.; GAISBERGER, M.; PROSSEGGER, J.; RITTER, M.; KOLARZ, P.; PICHLER, C.; THALHAMER, J.; HARTL, A. Does waterfall aerosol influence mucosal immunity and chronic stress? A randomized controlled clinical trial. **Journal of Physiological Anthropology**, v. 36, n. 10, p. 1-21, 2017.
- GRAY, M. **Geodiversity and Geoconservation: what, why, and how?** Geodiversity & Geoconservation, p. 4-12, 2005.
- HARTL, A.; GRAFETSTÄTTER, C.; PROSSEGGER, J.; HAHNE, H. B.; WINKLMAYR, M. Health effects of alpine waterfalls. In: SYMPOSIUM FOR

- RESEARCH IN PROTECTED AREAS, 5., 2013, Mittersill. **Proceedings** [...]. Mittersill: 2013, p. 265-268.
- JIANG, S.; MA, A.; RAMACHANDRAN. Negative air and their effects on human health na improvement. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 19, n. 10, out. 2018.
- KOLARZ, P.; GAISBERGER, M.; MADL, P.; HOFMANN, W.; RITTER, M.; HARTL, A. Characterization of ion sat Alpine waterfalls. **Atmos. Chem. Phys.**, v. 12, p. 3687-36-97, 2012.
- KUO, M. How might contact with nature promote human health? Promising mechanism sand a possible central pathway. **Front. Psychol.**, 2015, 6.
- LAZZERINI, F. T.; ORLANDO, M. T.; DE PRÁ, W. Progress of negative airions in health tourism environments applications. **Bol. Soc. Esp. Hidrol. Méd.**, v. 33, n. 1, 27-46, 2018.
- LIN, H.; LIN, J. Generation and determination of negative airions. **J. Anal. Test.**, v. 1, n. 6, 2017.
- LUTS, A.; PARTS, T.; LAAKSO, L.; HIRSIKKO, A.; GRÖNHOLM, T.; KULMALA, M. Some air electricity phenomena caused by waterfalls: correlative study of the spectra. **Atmospheric Research**, 91, 2009, 229-237.
- PEREIRA, D. I.; PEREIRA, P.; BRILHA, J. A geodiversidade no contexto dos serviços dos ecossistemas. In: RAMOS-PEREIRA, A., LEAL, M., BERGONSE, R., TRINDADE, J., REIS, E. (eds.). **Água e Território: um tributo a Catarina Ramos**. Lisboa: Centro de Estudos Geográficos, 2019. p. 251- 268.
- PICHLER, C.; WEIBÖCK-ERDHEIM, R.; FREIDL, J.; ROMODOW, C.; DISCHOF, M.; HARTL, A. **Synthesis reporton HEALPS' main outputs: WP2: medical-scientific characterization of alpine health resources**. European Regional Development Fund, 2018.
- PINO, O.; RAGIONE. F. There's something in the air: empirical evidence for the effects of negative air ions (NAI) on psycho physiological state and performance. **Research in Psychology and Behavioral Scienses**, v. 1, n. 4, 48-53, 2013.
- SIROTA, T. V.; SAFRONOVA, V. G.; AMELINA, A. G.; MAL'TSEVA, V. N.; AVKHACHEVA, N. V.; SOFIN, A. D.; YANIN, V. A.; MUBARAKSHINA, E. K.; ROMANOVA, L. K.; NOVOSELOV, V. I. The effectof negative air íons on the respiratory organs and blood. **Biophysics**, v. 53, n. 5, 457- 462, 2008.
- SUMMERS, J. K.; SMITH, L. M.; CASE, J. L.; LINTHURST, R. A. A Review of the Elements of Human Well-Being with na Emphasis on the Contribution of Ecosystem Services. **AMBIO**, v. 41, n. 327–340, 2012.
- TIKHONOV, V. P.; TEMNOV, A. A.; KUSHNIR, V. A.; SIROTA, T. V.; LITVINOVA, E. G.; ZAKHARCHENKO, M. V.; KONDRASHOVA, M. N. Complex therapeutical effec to ionized air: simulation of the immune system and decrease in excessive

serotonin. **IEEE Transactionson Plasma Science**, v. 32, n. 4, 1661-1665, 2004.

VECCHIA, A. V.; MUCCI, F.; POZZA, A.; MARAZZITI, D. Negative air ions in neuropsychiatric disorders, **Curr. Med. Chem.**, v. 28, n. 13, p. 2521-2359, 2021.

WU, C.; CHU, T.; CHEN, S.; WU, S. Generating negative air in construction water scapes at a Garden scale. **Environments**, v.6, n. 100, 2019.

YATES, A.; GRAY, F. B.; MISIASZEK, J. I.; WOLMAN, W. Air ions: past problem sand future directions. **Environment International**, v. 12, 99-108, 1986.